

「シリコン」絶縁を用いた直流電動機の試作 (第4報)

「シリコン」絶縁の温度上昇と絶縁抵抗, 絶縁破壊について

藤 宗 寛 治

A Trial Manufacture of a Silicone Insulated Direct Current Motor (IV)

Hiroharu FUJISO

It is to provide with the data of the silicone insulation on its insulating properties with regard to temperature rise, which is necessary in the designing of silicone insulated motor.

Some of the results of examination on the insulating properties of the silicone insulation are described.

I. 温度上昇と絶縁抵抗

〔1〕 緒 言

シリコン絶縁を用いた電気機器を設計する場合には温度上昇と絶縁抵抗, 絶縁破壊についてその資料を確認しておくことも必要である。

絶縁物の試験を行う場合には, 絶縁物個々について行う場合と, これを組立てて行う場合がある。

機器として組立てられると絶縁物の型, 厚さ等は各部に於て一様でないから, 絶縁物個々について行つた試験成績はそのまゝでは実用機に適合しない場合が多い。しかし絶縁物個々についての特性を究めておくことは実用機における絶縁を予測することを容易ならしめることができる。実際に近い試料をうればその成績は一層有用の度が高くなる。

絶縁物の試験規格は我国では J E S, 米国では A. S. T. M., 独国では V D E 等に定められている。

〔2〕 絶縁抵抗の測定法

絶縁抵抗を測定する方法には次の諸法がある。

- (1) 絶縁抵抗法
- (2) 検流計法
- (3) 弾力検流計法
- (4) 高絶縁抵抗測定法

しかし一般には (2) の直偏法を用うるのが便利である。

以下これによつて筆者の行つたシリコーン絶縁の体積固有抵抗の測定結果について述べる。
この場合、体積固有抵抗 R は次のようにして求める。

$$R = R_0 \times \frac{\text{試料面積 (cm}^2\text{)}}{\text{試料厚さ (cm)}} [\Omega\text{-cm}] \dots\dots\dots (1)$$

ここに $R_0 = \frac{500V}{\text{照尺読み (cm)}} \times 3.6 \times 10^{-10}$ である。

〔3〕 試料並びに測定装置

(a) 試料

シリコーン処理硝子繊維布 0.15mm のものについて Cure を行つたもの、行なわないものにわけて測定した。Cure は 250°C 3時間とした。

(b) 測定装置

(1) 電源

KX-142 を用いた直流 500V を使用し、その電圧調整には変圧器一次側にスライダックを挿入して一次側電圧を加減するようにした。検流計は 3.6×10^{-10} Amp/mm 感度のものを用いた。この場合の測定限界は約 $10^{16} \Omega\text{-cm}$ 程度である。

(2) 加熱炉

20cm × 20cm × 20cm の金属箱を熱絶縁して内部に電熱線を装置し、スライダックによつて各温度を調整できるようにした。温度の整定には約15分を要する程度とし電力調整を行つた。

(3) 電極

電極は板状絶縁物の規格によつた。Fig 1 にその略図を示す。

(4) 附属装置

倍率器及びシールド線を用いた。

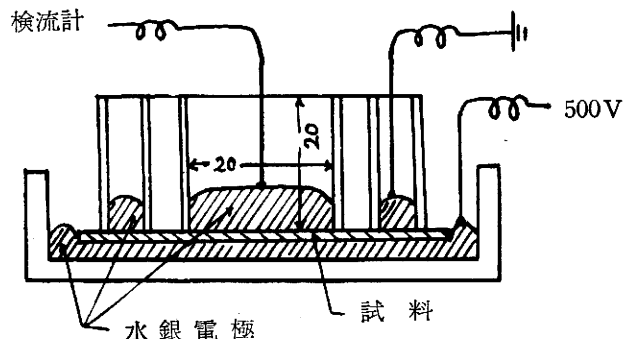


Fig 1 体積固有抵抗測定接続図

〔3〕 測定の結果

(a) 試料の厚さ

マイクロメーターを以て 40mm × 40mm の試料の 10点 を測定し平均厚さ 0.155mm を得た。

(b) 測定値 $[\Omega\text{-cm}]$

測定の結果を Fig 2 に示した。同図には参考のためシリコーン樹脂、ポビニール、W73Z ウエスの成績も比較して示した。

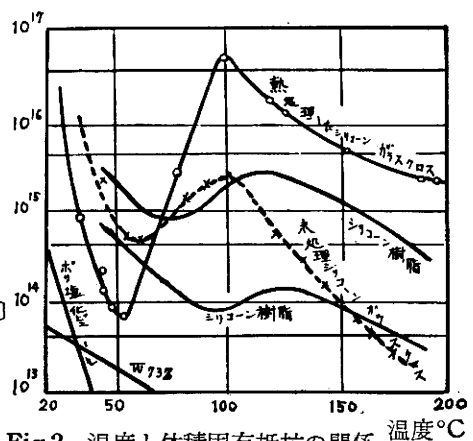


Fig 2 温度と体積固有抵抗の関係

〔4〕 考

察

（a） Cureの程度が絶縁抵抗に及ぼす影響に就いて

Fig 2に見るように Cureを行つたものと Cureを行わないものに就いてはその絶縁抵抗に大差がある。このことは実際使用の場合に Cureを充分行わなければならぬことを示している。

一般に絶縁物の電気伝導はその内部イオンが、電界の方向に移動すると信ぜられているから、この観点から Cureを行えばワニス類は硬化してイオン移動に対する抵抗を増すことは当然と考えられシリコンの如く高分子構造のものについては特にその傾向が著しいことが予想せられる。 $\text{CH}_3 : \text{Si} = 1.3 : 1$ の割合であるシリコン樹脂の場合は Fig 3 のように筆者の実験と全く類似の傾向を示している¹⁾。

以上の結果からシリコンガラス繊維布についても温度特性としてV特性があることが認められる。

Cureの温度が進むと体積固有抵抗は高くなり、かつ高温域ではその温度変化の割合が大きくなる。

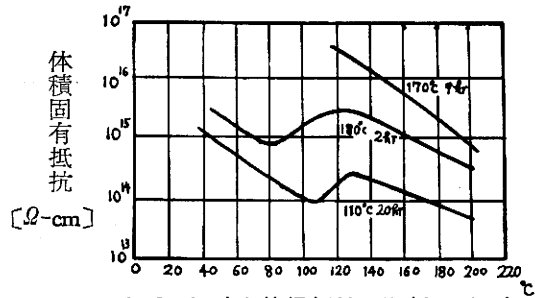


Fig 3 温度と絶縁抵抗の関係 温度
(図中文字は Curing の程度を示す)

（b） そ の 他 の 影 響

以上の外湿度含有物、樹脂の種類によつて影響をうけるけれども実用上 Cureを充分に行つた場合の体積固有抵抗は 200°C 附近で $10^{15} \Omega\text{-cm}$ 位と見てよい。

又表面抵抗はシリコンのみの場合は 100% R. H. の場合でも $10^{15} \Omega\text{-cm}$ 程度であるが、これをベークライト、硝子等に塗布すると基板の抵抗に近い値を示すようになるから、表面固有抵抗の低い基板にシリコンを塗布する場合には注意を要する²⁾。

Ⅱ. 温度上昇と絶縁破壊

〔1〕 緒

言

絶縁物が電圧に対して堪え得るか否かを試験するのに2つの場合がある。すなわち固体内部の絶縁破壊と表面の絶縁破壊である。しかもこの場合には時間、温度、湿度、周波数、装置等の影響を吟味しなくてはならない。

最近絶縁物の破壊の機構の論証に就いては相当進歩しているけれども複雑な物質についてはその理論は未だ確立していない。しかし電位傾度によつて固体内部にイオンの移動が行なわれイオン電流によつて熱的破壊がおこり、次いで電圧破壊に移行するであろうという一般的考え方は是認されている³⁾。

筆者はここではこれ等本質的問題にふれることなく実用化を目的とするH種絶縁の試験成績に就いて論ずることとする。

〔2〕 測 定 法

試験の方法は JIS—C—2103, A. S. T. M. によることにした。

実用的に絶縁物を試験するには二つの方法がある。

- (a) 電圧を加えて破壊を起させる最低電圧値を求めること。
- (b) 所定の電圧を加えて耐え得る時間を測定すること。

(a) は絶縁破壊試験 (b) は耐電圧試験である。

〔3〕 試料並びに測定装置

(a) 資 料

シリコン硝子繊維布 0.1mm のもの、シラススティックテープ 0.32mm のものについて夫々 Cure を行つたもの、Cure しないものにわけて試験を行つた。

Cure は 250°C 3 時間とした。

(b) 電 源

電源としては直流高压、商用周波数電圧、正弦波電圧等が用いられるけれども筆者の場合は 10 KV まで連続的に調整しうるネオン変圧器を用い、一次側にスライダックを入れて二次電圧を調整した。二次電圧はやや波形の歪んだ 60 ϕ 高電圧実効値となるわけである。波形の歪は実用上差支えないものとする。

(c) 電 極

電極には 25mm (周辺に 1 ~ 2.5mm の丸味をつけた) 円板に直径 12.5mm の球状電極のせ 500gr を加重して変圧器油中で測定するようにした。

A. S. T. M では試料の広い場合は $\frac{1}{4}$ " (周辺に $\frac{1}{32}$ " の丸味をつける) の棒ではさみ 0.1 ± 0.05 吋の重量を加えて試験する方法をとつている。

〔4〕 測 定 の 結 果

測定の結果は Fig 4 に示すようである。

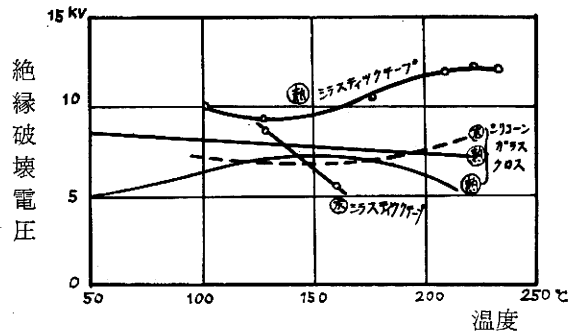


Fig 4

〔5〕 考 察

筆者の目的は絶縁破壊そのものを究明するのではないが、以上の結果に就いて若干考察を加えてみることにする。

(a) 縁 端 効 果

絶縁試験を行う場合に強電界の為に電極の縁端から沿面放電を起し絶縁の破壊が絶縁物の接触した電極面内でなく、電極の端又はその外側で起る現象でこの場合の破壊電圧は低くなる。

筆者の場合は比較的低電圧かつ油中であるからこの方法の顧慮は必要ないとする。

(b) 厚 さ の 影 響

縁端効果を考慮しなくてもよい程度の薄い試験片を用いる場合には破壊電圧は厚さに略比例する。しかし一般には厚さ t について t^n ($n < 1$) に比例するとされている。

シリコン樹脂の場合にも破壊電圧を V とすると次の式が成り立つ。

$$V = k t^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (2)$$

(c) 電 極 形 状 の 影 響**(d) 媒 質 の 影 響****(e) 電 源 の 影 響**

(c) (d) (e) についても一応の考察をしてみたが本論の範囲外なので省略し電圧上昇速度と温度について考察をつづけることにする。

(f) 電 圧 上 昇 速 度 の 影 響

電圧上昇速度を高くすればする程破壊電圧は高くなる。また寿命試験を行う場合の如きは電圧をかける時間が長くなれば破壊電圧は低く、短かければ高くなる。

F. W. Peek は次の式を提案している⁴⁾。

$$V_b = V_{bt} \left(1 + \frac{a}{\sqrt{\frac{t}{\tau}}} \right) \dots\dots\dots (3)$$

V_b : 絶縁破壊の強さ

V_{bt} : 加圧時間無限大のときの絶縁破壊の強さ (KV/mm)

τ : 加圧時間 (sec)

a : 常 数

本試験においても上昇速度の遅速によつて破壊電圧に若干の差の認められるものもあつたが実用上は顧慮を要しない程度と認め追究しないことにした。

(g) 破 壊 電 圧 と 温 度 と の 関 係

一般に固体誘電体の誘電率は温度とともに増大するが、これは主として伝導にあずかる陰陽の遊離イオンまたは伝導電子の数が温度とともに増加するからであつて、導電率 g と温度との関係は $g = g_0 e^{\alpha t}$ または $g = g_0 e^{-\frac{\beta}{T}}$ であらわすことが出来る。ここに g, α, β は常数である。

また電界が強くなると遊離イオンが増加し、その衝突または電子の衝突によつて電離伝導電子が増加してその結果導電率は急激に増大し遂に絶縁破壊にいたる。導電率 g と電界強度 E との間には $g = g_0 e^{\gamma E}$ なる関係がある。ここに γ は常数である。

この破壊電圧には温度に無関係な範囲と温度の増加とともに増加する範囲とがある。前者の低温範囲は電気破壊領域、後者の高温範囲は熱破壊領域と呼ばれ、前者では 10^{-8} 秒、後者では数秒ないし数10分以上に及ぶ場合がある。

著者の実験によれば Cure しないものの破壊電圧は温度に対して大体指数函数的に変化するものと認められるが、Cure したものについては殆ど変化が認められないのみか、強いていえば若干下降している程度である。

このことは従来の絶縁物の破壊電圧が温度と共に急激に低下するのに比べて著るしい特色をな

している。

豊田実はX線回折の観察からシリコン樹脂は硝子のような特性があり、また一面結晶性を有することからFröhlich、及び Von Hippel の行つた Fig 5 に示すシリカガラス、水晶の例を引いて、シリコン樹脂の絶縁破壊電圧が温度に対し殆んど影響をうけないことを説明している⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

H種絶縁の場合は硝子とシリコンとの組合せであるから下降効果の方が若干強いことが考えられ実験の結果もこれを裏書きしていることを指摘したが、全体として Cure が完全におこなわれていれば破壊電圧の温度特性は殆ど一定と見られることが首肯せられる。

〔6〕 衝撃電圧による絶縁破壊

温度には関係なしに単に衝撃電圧を加えた結果について述べる。

厚さともに 0.19mm のシリコン処理マイカプレート、シリコン処理ガラス繊維布を全波 10KV 40 μ s、直径 2mm の球電極で試験した結果は第1表のようである。

なお沿面絶縁破壊試験を行つたのでその結果を第2表に示す。

第2表測定時の室温 31 $^{\circ}$ C 気圧 741.5mm Hg 相対湿度 94% であ

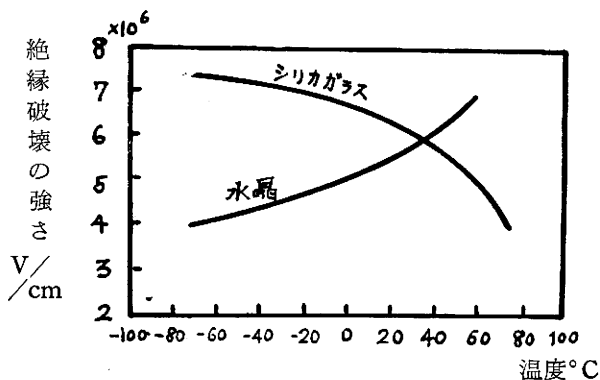


Fig 5 シリカガラスと水晶の温度と絶縁破壊電圧強度の関係

	Cure しないもの		Cure したの 250 $^{\circ}$ C 3hr	
	試料1枚	試料2枚	試料1枚	試料2枚
シリコン処理マイカプレート (0.19 mm)		OK		
シリコン処理ガラス繊維布 (0.19 mm)	OK	OK	OK	OK

20kv →

□ 合格 破壊

第1表 衝撃電圧による絶縁破壊成績

	Cure しないもの	Cure したの	
	10KV	10KV	20KV
シリコン処理マイカプレート	D = 電極間 9 mm OK		
シリコン処理ガラス繊維布	D = 8 mm OK	D = 8 mm OK 7 mm OK 6 mm OK	D = 14 mm OK 13 mm OK 12 mm OK

第2表 沿面絶縁破壊試験 (衝撃電圧)

つた。

なお第6図 (a) (b) に衝撃電圧波形とその破壊した場合の例を示す。

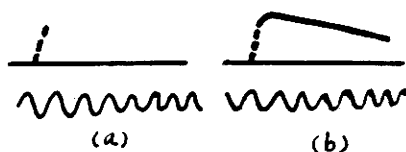


Fig 6 衝撃破壊電圧の1例

使用電圧 10KV、シリコンガラス繊維布 0.19mm を使用し (a) は破壊した場合 (b) は破壊しない場合を示す。

〔7〕 結

言

以上温度上昇と絶縁についてその測定結果より絶縁抵抗については 50°C 附近で体積固有抵抗が減少し 100°C 附近で急昇し漸次対数函数的に下降することが認められるから電気機器の使用直後における絶縁抵抗の変化には一応注意を払うことが必要である。しかし H 種絶縁以外の場合で他の材料の表面に塗布したような場合は母体の影響をうけることが知られているから注意を要する。

なお Cure は完全に行わなくてはならない。

絶縁破壊については 0.1mm の試料で $8000 \sim 10000\text{V}$ の耐電圧あるものと見てよい。しかも温度に対しては殆んど変化を認めない。この点是有機絶縁物と著しい差異のあるところである。

衝撃電圧については単に試験を行つたのみであるが、H 種絶縁を用いた乾式変圧器等の場合にはその試験要領について今後の研究が必要であると考えらる。

終りに臨み本研究に終始熱心な鞭撻と指導を頂いた京都大学阿部清名誉教授、林千博教授及び主として実験の指導協力を頂いた豊田実博士に対し厚く感謝の意を表する。衝撃電圧試験は株式会社立正電機製作所の好意によつて行つた。記して関係者への謝辞に代えたい。

参 考 文 献

1. 豊田実, 樹脂状シリコンの電氣的性質, p. 82.
 2. " " " , p. 95.
 3. 電気工学ハンドブック, p. 498.
 4. F. W. Peek, Dielectric Phenomena, p. 245 (1929).
 5. 豊田実, 樹脂状シリコンの電氣的性質, p. 117.
 6. Von Hippel, Phys. Rev., 59 820 (1941).
-